

温度对油纸绝缘空间电荷消散特性的影响

周远翔¹, 黄欣¹, 黄猛², 孟德望¹, 刘心曲¹, 曾向君³

(1. 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室, 清华大学电机系, 北京 100084;
2. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206; 3. 南方电网科学研究院, 广东 广州 510080)

摘要:换流变压器的出厂试验中,残留在电介质中的空间电荷将会影响绝缘试验。通过研究油纸绝缘中空间电荷的消散特性,可以为换流变压器出厂试验项目程序和时间间隔控制提供理论和试验依据,进而提出合理的试验方案。本文通过电声脉冲法和三电极法测量不同温度条件下的油浸纸试品,观察温度对油浸纸试品直流空间电荷消散特性的影响,并分析提取空间电荷总量、最大正向场强、油浸纸体积电导率等特征量。研究得到了油纸绝缘的活化能为0.48eV。随着温度升高,油纸绝缘不仅在去极化过程中空间电荷消散速度加快,在极化过程中其积聚总量也增加。去极化的初始阶段,最大正向场强出现的位置靠近阳极,随着去极化时间的延长,最大正向场强出现区域逐渐向阴极扩展。同样温度下,去极化过程中,电流达到稳定值的时间小于空间电荷总量消散达到稳定值的时间。在工厂试验和运行过程中,为避免空间电荷畸变电场造成对绝缘的损伤,去极化过程或极性反转时间间隔按照空间电荷总量消散达到稳定值的时间计算,不低于38min。

关键词:空间电荷;油纸绝缘;电荷消散;温度;电声脉冲法

DOI: 10.12067/ATEEE1708052 **文章编号:** 1003-3076(2018)07-0001-08 **中图分类号:** TM855;TM215

1 引言

目前,我国已经初步建成了覆盖全国范围的“三纵三横一环网”,在高压输电领域形成交直流输电共同发展的局面^[1]。电力设备的安全稳定运行是电网稳定的重要基石和前提条件^[2]。换流变压器因其能量转换的特殊作用,成为直流输电系统最关键的设备之一。相较于交流变压器,换流变压器除了承受交流高压和过电压,更要长时间承受直流高压的作用,因此较易发生事故^[3]。国际大电网组织(International Council on Large Electric systems, CIGRE)对全球换流变压器故障次数进行了统计^[4],结果表明绝缘故障是换流变压器故障的主要原因。换流变压器的主要绝缘材料是由变压器油和绝缘纸构成的组合绝缘系统^[5],在直流电压的长时间作用下,载流子的定向运动容易在固体电介质中积聚空间电荷,而空间电荷在电介质中的注入、积聚、迁移和消散过程均会畸变电介质内部电场,从而影响材

料的绝缘性能^[6]。

目前,极化过程中空间电荷的注入、积聚、迁移及其对绝缘性能的影响研究备受关注。2008年,国内学者将电声脉冲法(Pulsed Electro-Acoustic, PEA)首次应用于变压器油纸绝缘电介质的空间电荷特性研究^[7],并研究了场强对油纸空间电荷效应的影响。其后,学者们对不同环境条件下油纸绝缘空间电荷特性进行了大量的研究,Liu等发现含水量将严重影响油纸中空间电荷的积聚速度和注入深度^[8]。电介质中的空间电荷相关研究表明,温度是影响空间电荷特性的重要因素之一。廖瑞金等研究了水分和温度联合作用下多层油纸中的空间电荷特性,结果表明含水量越高,油纸中慢速运动的电荷量越少,水分和高温利于电荷的注入和迁移^[9,10]。唐超利用浅陷阱理论解释了温度对空间电荷的注入速度和注入深度的影响,其结果是温度升高,空间电荷总量增大^[11]。吴锴则指出不同温度梯度下,油纸绝缘中的杂质电离为空间电荷的主要来源,并且温度

收稿日期: 2017-08-16
基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0902704)、南方电网公司科技项目(KY2014-2-0016)
作者简介: 周远翔(1966-),男,福建籍,教授,博导,博士,从事高电压与绝缘技术的教学与科研工作;
黄欣(1994-),女,湖南籍,博士研究生,从事高电压绝缘技术研究。

梯度升高促进电离作用,使空间电荷总量增加,场强畸变增大^[12]。文献[12]的研究专注于极化过程空间电荷的来源及其对绝缘性能的影响^[13],而去极化过程中的空间电荷消散特性对绝缘性能和运维试验的影响目前尚缺乏足够的认识。

根据国家标准,换流变压器的出厂试验应包含绝缘试验,其中包括冲击试验、外施直流电压耐受试验和局部放电测量等^[14]。实践表明残留空间电荷将影响绝缘试验的结果。在耐压试验中绝缘材料被注入大量空间电荷,若消散不完全则会引起局部放电起始电压下降、放电水平提高,造成对换流变压器绝缘状态的误判,严重者直接导致设备绝缘性能的下降^[15]。工厂的实际试验过程中也发现,受试验环境条件如温度等的影响,有时受残留空间电荷的影响出现局部放电起始电压和放电水平异常,有时又没有这种现象发生。因此研究油纸绝缘空间电荷的消散特性将为换流变压器的出厂试验项目程序和时间间隔控制提供理论和试验依据,进而提出更为合理的试验方案。换流变压器运行过程中空间电荷的存在在极性反转过程中将危及油纸绝缘甚至使绝缘失效。受到环境和材料特性等诸多因素对空间电荷消散的影响,难以准确判断空间电荷是否存在并对绝缘具有潜在的威胁。在这些影响因素中,温度是一个关键的环境参数。

本文采用PEA测量平台和三电极试验方法测量20℃、40℃和60℃下油纸绝缘试品的空间电荷分布和电导电流,并进行数据分析和理论计算,求解空间电荷总量、正向电场强度、体积电导率等特征量,探究温度对空间电荷消散特性的影响规律。

2 试验

2.1 油浸纸试品制备

本文中采用的试品为130 μm 厚的绝缘纸,所浸油品为商用环烷基变压器油。

为了避免水分对测量结果的影响,试品经过干燥吹,制备和保存流程为:

(1)将绝缘纸裁剪成6cm \times 6cm的纸片,去掉四角使其尽量呈圆形并放入真空干燥箱中,在90℃下干燥48h。

(2)对变压器油进行过滤,并放入真空干燥箱干燥48h。

(3)将干燥后的纸浸入干燥后的油中,在50℃下抽真空浸渍绝缘纸样品48h以上。

(4)将试样放置在玻璃瓶中并置于真空干燥箱内保存。

2.2 油浸纸空间电荷测量

为了更好地测量不同温度条件下油浸纸绝缘介质中空间电荷的消散特性,同时降低测量过程中发生击穿的概率,本试验分别在20℃、40℃和60℃温度下向油浸纸试品施加20kV/mm电场进行极化。极化时间90min,保证极化结束时油浸纸试品中空间电荷积聚处于饱和状态。测量撤去电压后去极化30min时,试品中的空间电荷消散基本结束。采用PEA法测量极化和去极化过程中空间电荷分布^[16]。为了减小分散性对试验结果的影响,在每种温度条件下对多个油浸纸试品进行测量,取空间电荷的平均值作为空间电荷分布特性的结果。

2.3 电导电流测量

采用三电极法测量电介质的电导电流^[17]。为了便于与空间电荷测量结果进行对比分析,电导电流的测试条件与空间电荷的测试条件保持一致,即在20℃、40℃和60℃温度下向油浸纸试品施加20kV/mm的极化电场。同样为了在极化过程和去极化过程结束时,极化电流和去极化电流均分别达到其稳定值,对油浸纸试品极化90min,随后撤去电场,测量去极化过程中30min内空间电荷消散过程中电导电流的变化。

3 试验结果

3.1 极化过程油浸纸中空间电荷分布及电流衰减典型特性

极化过程中油浸纸试品在极化时间 $t=60\text{min}$ 和 $t=90\text{min}$ 两时刻的空间电荷分布基本一致,且 $t=60\text{min}$ 以后的电流也基本稳定不变,其空间电荷分布和电流典型特性如图1所示(以20℃温度下的极化过程为例)。虚线指示的是油纸试样与电极的分界面。

3.2 去极化过程中油浸纸空间电荷的消散特性

20℃、40℃和60℃下去极化过程中空间电荷随时间的消散特性如图2所示。本文分别选取了撤压起始点 $t=0.5\text{min}$ 、10min和30min四个时间节点分析电荷密度分布。

由于极化过程中,电极附近的油浸纸试样中有同极性电荷注入, $t=0$ 时刻,在阳极附近有明显的正电荷积聚(见图2(a))。

由于极化时两端电极附近注入电荷较多,因此

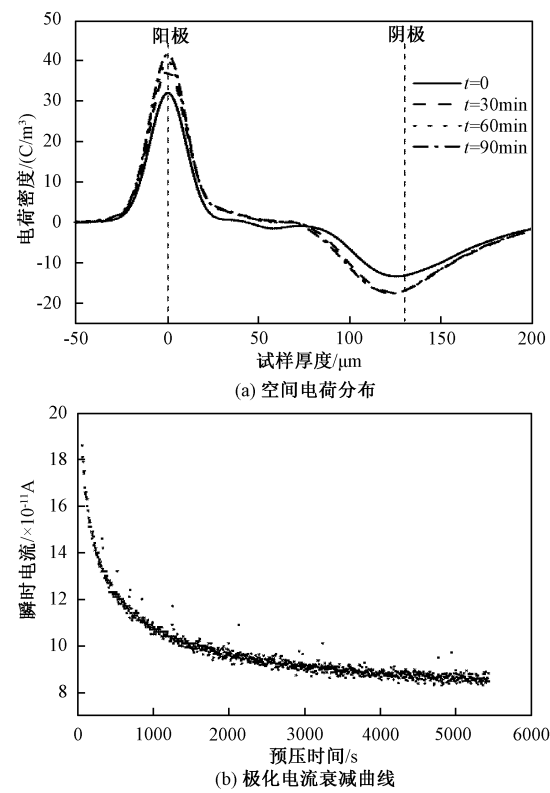


图1 极化过程油浸纸空间电荷分布及电流衰减特性(20℃)

Fig.1 Space charge distribution and polarization current curves of oil-paper samples under 20℃

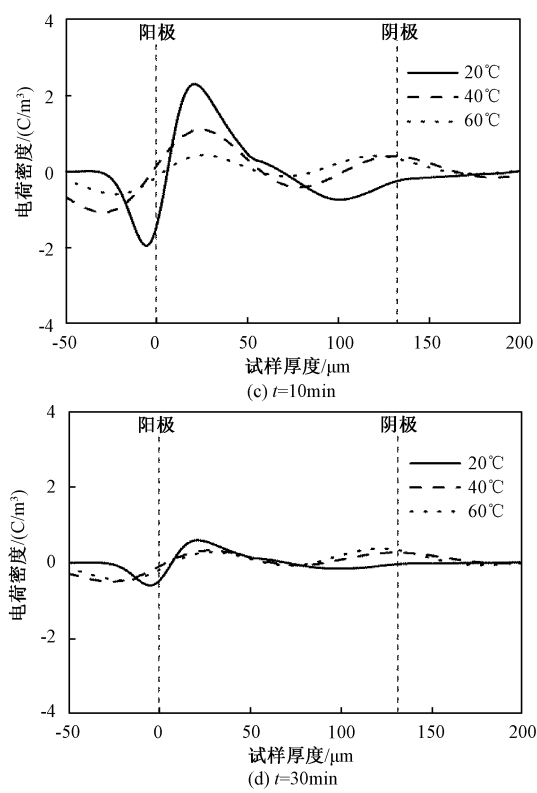
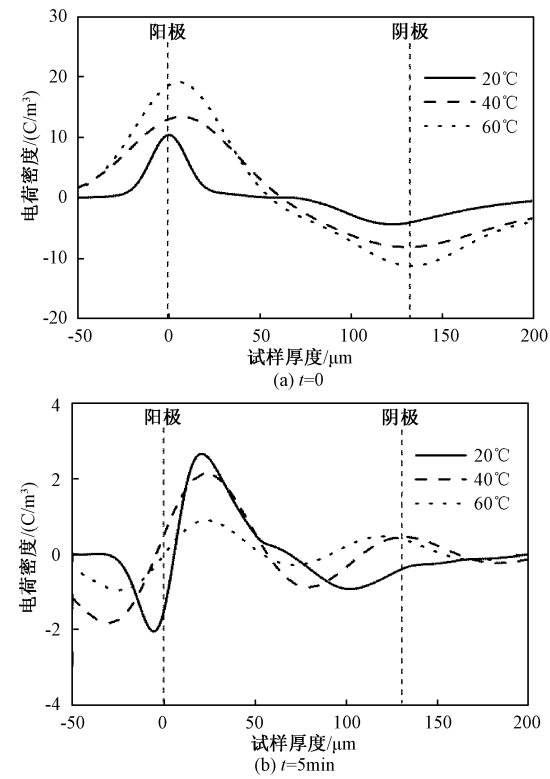


图2 不同温度下油浸纸空间电荷随时间的消散过程

Fig.2 Space charge distribution curves of oil-paper samples under different temperatures



在去极化的初始阶段,电极附近的同极性积聚电荷感应出大量相反极性的感应电荷,部分感应电荷入侵油纸边界部分。因此, $t=5\text{min}$ 图像相对于 $t=0$ 图像,在阳极附近聚集了大量的负电荷,同时原来在阳极处的正电荷峰向油浸纸试样内部移动,且在阴极附近也可以发现类似的行为。即在消散过程的初始阶段,油浸纸试样两电极附近的电荷峰向纸内不断靠拢。以温度为 20°C 的曲线为例,其正电荷峰在 $t=0$ 时位于 $x=0$ 处;在 $t=5\text{min}$ 时位于 $x=20\mu\text{m}$ 处;在 $t=30\text{min}$ 时位于 $x=21\mu\text{m}$ 处。其中, x 为油纸厚度方向的距离, $x=0$ 时即为油纸靠近阳极的临界面位置。

在正负电荷峰向纸内移动的过程中,同时发生空间电荷消散和中和的过程。具体体现在正负电荷峰值的不断减小。同样以温度 20°C 时的曲线为例,其正电荷峰在 $t=0$ 时峰值为 $10.1\text{C}/\text{m}^3$; $t=5\text{min}$ 时峰值为 $2.6\text{C}/\text{m}^3$; $t=10\text{min}$ 时峰值为 $2.3\text{C}/\text{m}^3$; $t=30\text{min}$ 时峰值为 $0.7\text{C}/\text{m}^3$ 。

从电荷峰值上看,在消散过程中,温度与正电荷峰值关系复杂。在消散初始阶段,温度越高,正电荷峰值越高;消散一段时间后,温度越高,正电荷峰值越低。图2中, $t=0$ 时,温度与正电荷峰值呈正相关;而自 $t=5\text{min}$ 及以后,温度与正电荷峰值则呈负相关。

3.3 去极化过程中电流的衰减特性

20℃、40℃和60℃温度下去极化过程中电流随时间的衰减特性曲线如图3所示。图3中电流值均为负值,表示消散过程中,去极化电流流向与极化过程电流流向相反。由图3可知,不同温度下电流衰减曲线遵循常见的指数型衰减,且电流均趋于 $-1\times 10^{-11}\text{A}$ 稳定值,表明去极化过程中油纸空间电荷消散电流稳定值不受温度影响。

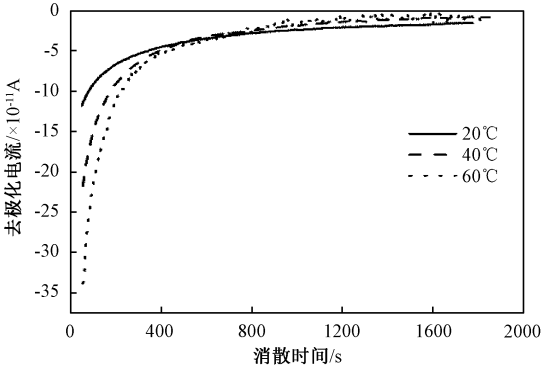


图3 不同温度下去极化过程中电流衰减曲线
Fig.3 Depolarization current decaying curves under different temperatures

4 分析与讨论

4.1 空间电荷总量

空间电荷总量指绝缘电介质内所有空间电荷量的绝对值之和。空间电荷总量表征深浅陷阱数量,计算公式为:

$$Q(t) = \int_0^d |\rho(x,t)| S dx \quad 0 \leq x \leq d \quad (1)$$

式中, $Q(t)$ 为空间电荷总量; $\rho(x,t)$ 为空间电荷密度值; S 为电极面积; d 为试样厚度。由此计算得到空间电荷总量,如图4所示。

图4中,横坐标代表以撤压时刻为起始点的时间,纵坐标代表空间电荷总量。可以看出,在0~20s阶段内,空间电荷总量的大小关系为 $Q_{60^\circ\text{C}} > Q_{40^\circ\text{C}} > Q_{20^\circ\text{C}}$;在20~80s阶段内,空间电荷总量的大小关系为 $Q_{40^\circ\text{C}} > Q_{60^\circ\text{C}} > Q_{20^\circ\text{C}}$;在80~290s阶段内,空间电荷总量的大小关系为 $Q_{40^\circ\text{C}} > Q_{20^\circ\text{C}} > Q_{60^\circ\text{C}}$;在

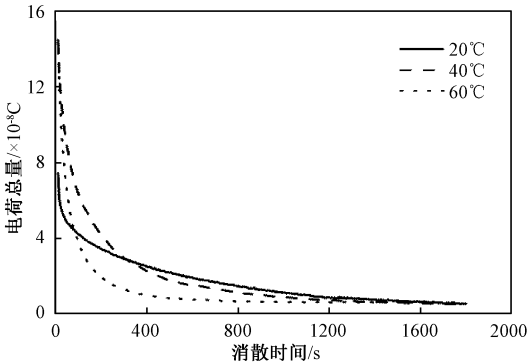


图4 不同温度下空间电荷总量消散曲线
Fig.4 Decay curves of space charge amount under different temperatures

290s以后,空间电荷总量的大小关系为 $Q_{20^\circ\text{C}} > Q_{40^\circ\text{C}} > Q_{60^\circ\text{C}}$ 。即在消散过程中,温度与空间电荷总量呈非单调关系,消散初始阶段,温度越高,空间电荷总量越高;消散一段时间后,温度越高,空间电荷总量越低。而消散30min之后,三种试样的空间电荷总量明显已经趋于平稳,且相差趋于一致,可认为在误差允许范围内,空间电荷消散结束。

试品中空间电荷总量随时间的变化拟合关系如表1所示,其中 Q 的单位为C。空间电荷的消散与消散时间成指数衰减关系。

表1 不同温度油纸试样空间电荷总量与消散时间的关系

Tab.1 Relationship between space charge amount and decay time under different temperatures			
温度/℃	拟合曲线	R^2	
20	$Q_{20^\circ\text{C}} = 4.807 \times 10^{-8} e^{(-t/455)} + 5.258 \times 10^{-9}$	0.98	
40	$Q_{40^\circ\text{C}} = 1.102 \times 10^{-7} e^{(-t/177)} + 7.911 \times 10^{-9}$	0.98	
60	$Q_{60^\circ\text{C}} = 1.317 \times 10^{-7} e^{(-t/71)} + 7.014 \times 10^{-9}$	0.98	

由表1可见,随着温度的升高,极化90min时(即消散开始时刻)油纸的空间电荷总量随之增大,与图2中 $t=0$ 时刻空间电荷分布的峰值状态一致。

预压90min后,油纸内空间电荷基本达到饱和状态,此时的空间电荷总量决定于油纸内陷阱数量与深度^[18,19]。随着温度升高,绝缘材料内部更多的局域态受到激发,在陷阱数量增加的同时,浅陷阱数量也增加,导致油纸电介质中积聚的空间电荷总量增大,图2中的测量结果与此相吻合。一旦撤去外加电压后,由于浅陷阱数量的增加,较高温度的去极化过程中脱陷加速,电荷脱陷的概率增大^[20],宏观上表现为空间电荷消散更快,正电荷峰值降落更快,最终使得温度与空间电荷总量、正电荷峰值的相关关系发生反转。

从总电荷量的衰减时间常数来看,随着温度升高,时间常数不断减小,表明温度促进空间电荷消散。温度从 20℃ 升至 40℃,时间常数减小了 278s;而温度从 40℃ 升至 60℃,时间常数减小了 107s。随温度升高,空间电荷消散时间常数随温度的变化率减小。油纸介质中空间电荷总量的消散时间按照 5 倍的时间常数计算,通常情况下,空间电荷消散达到稳定值需要的时间按照 20℃ 的情况计算不低于 38min,随着温度升高,需要的时间更短。

4.2 最大正向场强

油纸内正向电场强度最大值指在油纸厚度方向上各个点中,方向由阳极指向阴极的电场强度的最大值。正向电场强度最大值可表征空间电荷的集聚程度和集聚数量,计算方法为:首先根据式(2)计算出油纸内每一点的电场强度值,在此基础上取所有数值中的最大值。

$$E(x,t) = \int_0^x \frac{\rho(x,t)}{\epsilon_0 \epsilon_r} dx \quad 0 \leq x \leq d \quad (2)$$

式中, $E(x,t)$ 为绝缘油纸内各个点在各时刻的场强值,正值代表方向由阳极指向阴极,负值代表方向由阴极指向阳极; ϵ_0 为真空介电常数, $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$; ϵ_r 为油纸相对介电常数。由实测得到不同温度下最大正向场强衰减曲线,如图 5 所示。

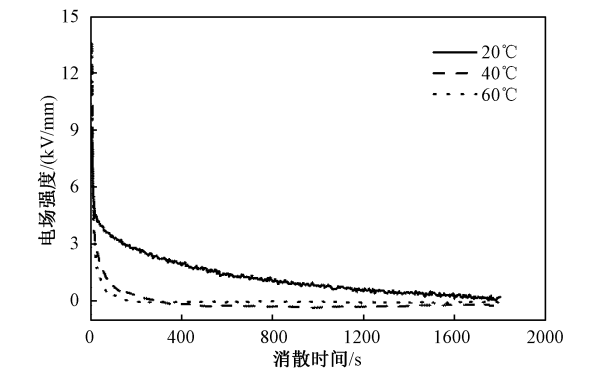


图 5 不同温度下最大正向场强衰减曲线
Fig. 5 Decay curves of maximum of positive field strength under different temperatures

从同一时刻最大正向场强的大小顺序来看,图 5 体现出与图 4 相似的规律。消散前 20s 内,最大正向场强关系为 $E_{60^\circ\text{C}} > E_{40^\circ\text{C}} > E_{20^\circ\text{C}}$;而在 20 ~ 360s 阶段内最大正向场强关系为 $E_{20^\circ\text{C}} > E_{40^\circ\text{C}} > E_{60^\circ\text{C}}$;360s 之后虽然 $E_{40^\circ\text{C}}$ 与 $E_{60^\circ\text{C}}$ 关系反转,然而由于两者相对于 $E_{20^\circ\text{C}}$ 而言均极小,可认为是设备或试样产生的随机误差所致。同时,消散 30min 后, $E_{60^\circ\text{C}}$ 、 $E_{40^\circ\text{C}}$ 、 $E_{20^\circ\text{C}}$ 均衰减至低于 0.5kV/mm,趋近于 0。根据式

(2),最大正向场强与正电荷积分值呈正相关,又因为不同温度下空间电荷分布规律基本一致,再结合式(1),可认为最大正向场强与空间电荷总量趋势基本一致。

从最大正向场强出现的位置来看,在 $t = 3\text{min}$ 左右 $E_{60^\circ\text{C}}$ 的最大正向场强出现在阴极附近,在 $t = 16\text{min}$ 时, $E_{40^\circ\text{C}}$ 的最大正向场强出现在阴极附近,并保持到去极化过程结束,且 $E_{40^\circ\text{C}}$ 与 $E_{60^\circ\text{C}}$ 均出现了负值,说明与阳极的情况类似,在去极化的初始阶段,油浸纸试品阴极处也感应出了大量的正电荷,并有部分感应出的正电荷侵入油浸纸边界,且在去极化最后阶段仍有残留。而最大正向场强出现位置的变化几乎是以阶跃形式变化的,这可能是由于侵入的感应电荷少于极化过程中注入的同极性电荷,因此在去极化的初始阶段,最大正向场强出现的位置靠近阳极,当阳极附近的正电荷峰消散到一定程度后,阴极附近正电荷对电场的作用更明显,最大正向场强出现区域随即扩展至阴极附近。

4.3 体积电导率

油纸体积电导率与温度的关系如表 2 所示。随温度的升高,极化过程中油纸体积电导率增大。根据陷阱理论,温度的升高使得油浸纸介质中浅陷阱密度增大,同时空间电荷活化比例增加,热电子产生的概率及其能量大大提高,从而加剧了油浸纸中纤维素链的破坏。而且温度的升高也使得能级相对较深的陷阱被激发,油浸纸介质储存空间电荷的总量提升,导致油纸导电性增加,表现为电导率随温度的升高而增大^[21]。

表 2 体积电导率与温度关系

Tab. 2 Relationship between body conductivity and temperature

温度/℃	电导率/ $\times 10^{-15} \text{ (S/m)}$
20	8.76
40	37.96
60	84.60

因为温度升高,活化载流子浓度增大,电导率提升,极化稳定电流也随之提升。

极化电流的稳定值服从阿伦尼乌斯方程,如式(3)所示:

$$J = J_0 \exp(-\Phi/kT) \quad (3)$$

式中, J 为电流密度; J_0 为常数; T 为温度; k 为玻尔兹曼常数; Φ 为活化能^[22]。

式(3)表明,极化电流密度的对数与温度的倒数之间服从线性关系,因此可以根据实测值计算得

到在所施加的电场下油浸纸介质的活化能,结果如图 6 所示。通过计算可以得到,油浸纸介质的活化能约为 0.48eV,此结果与已有文献研究结果相吻合^[23]。

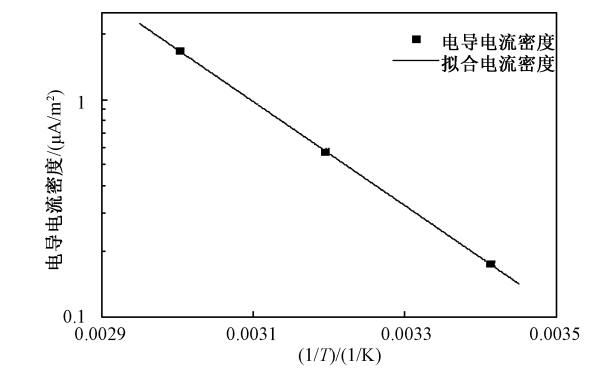


图 6 油浸纸电导电流密度与温度关系曲线
Fig. 6 Arrhenius plots of conductance current density against temperature

油浸纸绝缘介质试品的去极化电流曲线如表 3 所示,其中 I 的单位为 A。三组试样的衰减时间常数分别为 310s、212s 和 160s。可见,温度越高,油纸消散电流衰减时间常数越小,衰减速度越快。这是因为一方面,温度升高致使油浸纸内部浅陷阱数量增加,极化结束时空间电荷总量增大,正负电荷峰的峰值也增加,导致消散过程中油浸纸内部场强增加,改变了介质内部的势能分布,使得陷阱电荷更加容易冲破陷阱束缚形成空间电荷电流^[24];另一方面,温度升高使得空间电荷载体粒子平均动能增加,即活化粒子比例增加,脱离陷阱束缚形成空间电荷电流的概率也增大,导致电荷消散更快,进而使得电流衰减更快。

表 3 去极化电流曲线

Tab.3 Depolarization current curves

温度 /℃	拟合曲线	R^2
20	$I_{20℃} = -9.994 \times 10^{-11} e^{(-t/311)} - 1.845 \times 10^{-11}$	0.99
40	$I_{40℃} = -2.206 \times 10^{-10} e^{(-t/213)} - 1.371 \times 10^{-11}$	0.98
60	$I_{60℃} = -3.923 \times 10^{-10} e^{(-t/161)} - 1.407 \times 10^{-11}$	0.97

通常情况下,与空间电荷总量消散情形相似,去极化过程电流达到稳定值需要的时间按照 20℃ 的情况计算不低于 26min,随着温度升高,需要的时间更短。与表 2 中空间电荷总量变化过程相比,去极化电流达到稳定值所需时间更短。由于电介质内部电场分布畸变是由残留的空间电荷造成的,所以在工厂试验和运行中极性反转的时间间隔取决于去极

化过程中空间电荷总量的变化,而不是电流的变化。

5 结论

本文主要针对不同温度下的空间电荷消散特性展开研究,主要结论如下:

- (1)随着温度升高,油纸绝缘不仅在去极化过程中空间电荷消散速度加快,在极化过程中其积聚总量也增加。
- (2)去极化的初始阶段,最大正向场强出现的位置靠近阳极,随着去极化时间的延长,最大正向场强出现区域逐渐向阴极扩展。
- (3)油纸绝缘的活化能为 0.48eV。
- (4)同样温度下,去极化过程中,电流达到稳定值的时间小于空间电荷总量消散达到稳定值的时间。
- (5)在工厂试验和运行过程中,为避免空间电荷畸变电场造成对绝缘的损伤,去极化过程或极性反转时间间隔按照空间电荷总量消散达到稳定值的时间计算,不低于 38min。

参考文献 (References):

[1] 王梦云 (Wang Mengyun). 110kV 及以上变压器事故与缺陷统计分析 (Statistic analysis of tr ansformer's faults and defects at voltage 110 kV and above) [J]. 供用电 (Distribution & Utilization), 2007, 24 (1): 1-5.

[2] 郭少朋, 韩立, 徐鲁宁, 等 (Guo Shaopeng, Han Li, Xu Luning, et al.). 光纤传感器在局部放电检测中的研究进展综述 (Review of research on fiber optic sensors for partial discharge detection) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering & Energy), 2016, 35 (3): 47-53.

[3] GB/T 18494.2-2007, 交流变压器-第 2 部分: 高压直流输电用换流变压器 (Converter transformers-Part 2: Transformers for HVDC applications) [S].

[4] CIGRE Advisory Group B4.04. HVDC LCC converter transformers-Converter transformers failure survey results from 2003 to 2012 [R]. 2015.

[5] 陈杨, 蔡金铤, 林燕楨 (Chen Yang, Cai Jinding, Lin Yanzhen). 基于油纸绝缘等效电路的变压器微水含量研究 (Research of micro water content of oil-paper transformer based on oil-paper insulation system's equivalent circuit method) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2015, 34 (5): 47-53.

[6] 金福宝, 周远翔, 黄猛, 等 (Jin Fubao, Zhou Yuanxiang, Huang Meng, et al.). 老化对交直流复合电场下

- 油纸绝缘沿面放电过程特性的影响 (Effects of oil-paper aged state on characteristics of creepage discharge process under combined AC-DC voltage) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2015, 41 (12): 4120-4130.
- [7] Zhou Yuanxiang, Wang Yunshan, Li Guangfan, et al. Space charge phenomena in oil-paper insulation materials under high voltage direct current [J]. Journal of Electrostatics, 2009, 67 (2-3): 417-421.
- [8] Liu R, Jaksts A, Tornkvist C, et al. Moisture and space charge in oil-impregnated pressboard under HVDC [A]. IEEE International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics [C]. 1998. 17-22.
- [9] 廖瑞金, 周之, 郝建, 等 (Liao Ruijin, Zhou Zhi, Hao Jian, et al.). 水分和温度联合作用时油浸绝缘纸空间电荷特性 (Space charge characteristics of oil immersed paper under moisture and temperature effect) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2012, 38 (10): 2647-2654.
- [10] Hao Jian, Chen George, Liao Ruijin, et al. Influence of moisture on space charge dynamics in multilayer oil-paper insulation [J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2012, 19 (4): 1456-1464.
- [11] Tang Chao, Chen G, Fu Mingli, et al. Space charge behavior in multi-layer oil-paper insulation under different DC voltages and temperatures [J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2010, 17 (3): 775-784.
- [12] 吴锴, 朱庆东, 陈曦, 等 (Wu Kai, Zhu Qingdong, Chen Xi, et al.). 温度梯度效应对油纸绝缘材料空间电荷分布特性的影响 (Effect of temperature gradient on space charge distribution in oil impregnated papers) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2011, 37 (4): 823-827.
- [13] 李猛, 汪泓, 王湘汉 (Li Meng, Wang Feng, Wang Xianghan). 不同电极结构中 SF_6/N_2 混合气体正向流注电晕放电特性 (Anode-directed streamer corona discharge simulation in different electrode structures in SF_6/N_2 gas mixtures) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2015, 34 (3): 24-28.
- [14] 钟力生, 李盛涛, 徐传骧, 等 (Zhong Lisheng, Li Shengtao, Xu Chuanxiang, et al.). 工程电介质物理与介电现象 (Engineering dielectric physics and dielectric phenomena) [M]. 西安: 西安交通大学出版社 (Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press), 2013.
- [15] 唐超 (Tang Chao). 油纸绝缘介质的直流空间电荷特性研究 (Studies on the DC space charge characteristics of oil-paper insulation materials) [D]. 重庆: 重庆大学 (Chongqing: Chongqing University), 2010.
- [16] 周远翔, 王宁华, 王云杉, 等 (Zhou Yuanxiang, Wang Ninghua, Wang Yunshan, et al.). 固体电介质空间电荷研究进展 (Review of research on space charge in solid dielectrics) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2008, 23 (9): 16-25.
- [17] 黄云程, 蔡金锭 (Huang Yuncheng, Cai Jinding). 应用去极化能量谱评估变压器绝缘老化受潮状态 (Diagnosis of insulation condition of transformers by using depolarization energy spectrum) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (1): 53-59.
- [18] 郝建 (Hao Jian). 变压器油纸绝缘热老化的时频域介电和空间电荷特性研究 (Study on time/frequency domain dielectric spectroscopy and space charge characteristics of transformer oil-paper insulation thermal aging) [D]. 重庆: 重庆大学 (Chongqing: Chongqing University), 2012.
- [19] 郑飞虎, 张治文, 肖春 (Zheng Feihu, Zhang Yewen, Xiao Chun). 聚合物电介质的击穿与空间电荷的关系 (Relationship between breakdown in polymer dielectrics and space charge) [J]. 材料科学与工程学报 (Journal of Materials Science & Engineering), 2006, 24 (2): 316-320, 285.
- [20] 周远翔, 黄猛, 陈维江, 等 (Zhou Yuanxiang, Huang Meng, Chen Weijiang, et al.). 直流电场下油纸绝缘介质界面处的空间电荷特性 (Space charge characteristics of the interface in oil-paper insulation under DC voltage) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2011, 37 (10): 2417-2423.
- [21] 刘康淋, 廖瑞金, 赵学童 (Liu Kanglin, Liao Ruijin, Zhao Xuotong). 声脉冲法空间电荷测量系统的研究 (Measurement of space charges in air based on sound pulse method) [J]. 物理学报 (Acta Physica Sinica), 2015, 64 (16): 164301.
- [22] Zhou Yuanxiang, Wang Ninghua, Yan Ping, et al. Annealing effect on DC conduction in polyethylene films [J]. Journal of Electrostatics, 2002, 57 (3-4): 381-388.
- [23] Koufakis E I, Halevidis C D, Polykrati A D, et al. Calculation of the activation energy of oil-paper insulation in a distribution transformer [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2012, 28 (2): 52-58.
- [24] 李吉晓, 张治文, 夏钟福, 等 (Li Jixiao, Zhang Yewen, Xia Zhongfu, et al.). 空间电荷在聚合物老化和击穿过程中的作用 (Space charge in polymer aging and breakdown processes) [J]. 科学通报 (Science Bulletin), 2000, 45 (23): 2469-2475.

Influences of temperature on space charge dissipation in oil-paper insulation

ZHOU Yuan-xiang¹, HUANG Xin¹, HUANG Meng², MENG De-wang¹,
LIU Xin-qu¹, ZENG Xiang-jun³

(1. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipment,
Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. School of
Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
3. Electric Power Research Institute, China Southern Power Grid Company, Guangzhou 510080, China)

Abstract: In the converter transformer's delivery test, the space charge remained in the dielectric will affect the insulation test. By studying the dissipation characteristics of space charge, it is possible to provide the theoretical and experimental basis for converter transformer delivery test program and time interval control, and then put forward to reasonable testing program. To observe the influence of temperature on space charge dissipation behavior, pulsed electroacoustic (PEA) method and three-electrode method are used to test oil-paper sample under different temperature. Besides, the space charge amount, the maximum of positive field strength and the oil-paper conductivity are calculated. The activation energy of oil paper insulation was 0.48eV. With the increase of temperature, space charge in oil-paper insulation not only accelerates the dissipation rate in the process of depolarization, but also increases its accumulation in the process of polarization. At the initial stage of depolarization, the maximum forward field intensity appears near the anode, and gradually toward the cathode over time. At the same temperature, during the depolarization process, the time when the current reaches a steady value is less than the time when the total space charge dissipates to a steady value. During the test and operation, in order to avoid the damage to the insulation caused by the space charge distortion electric field, the depolarization process or the polarity reversal time interval should be not less than 38min calculated according to the time when the space charge is dissipated to a stable value.

Key words: space charge; oil-paper insulation; charge dissipation; temperature; pulsed electroacoustic method